

**А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. А. ТКАЧУК, М. О. БОНДАРЕНКО, Є. В. ПЕЛЕСЬКО, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ,
А. Ю. ТАНЧЕНКО, Г. В. ЦЕНДРА, А. В. ШЕВЧЕНКО**

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛІ МАКЕТУ БРОНЕКОРПУСУ

У роботі наведено розрахунково-експериментальне порівняння динамічних характеристик фрагменту макету корпусу БТР-80. Методика експериментального дослідження полягала у визначенні динамічного відгуку від дії ударного навантаження прогумованим ударником. Результати знімалися аналізатором спектру вібрацій 795М за допомогою датчика прискорень ДН-3-М1. Чисельні дослідження виконані в модулі перехідного динамічного аналізу. Для отриманих залежностей побудовані перетворення Фур'є. Окремим етапом розрахунково-експериментальних досліджень було виконано варіювання маси бойового модуля. Визначено, що результати, отримані експериментальним методом, добре узгоджуються з аналогічними результатами, які отримані розрахунковими методами.

Ключові слова: динамічна система; експериментальні дослідження; чисельні дослідження; метод скінченних елементів; бронетранспортер; макет

**А. В. ГРАБОВСКИЙ, Н. А. ТКАЧУК, М. А. БОНДАРЕНКО, Е. В. ПЕЛЕСЬКО, А. Ю. ВАСИЛЬЕВ,
А. Ю. ТАНЧЕНКО, Г. В. ЦЕНДРА, А. В. ШЕВЧЕНКО**

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ МАКЕТА БРОНЕКОРПУСА

В работе приведено расчётно-экспериментальное сравнение динамических характеристик фрагмента макета корпуса БТР-80. Методика экспериментального исследования заключалась в определении динамического отклика от действия ударной нагрузки прорезиненным ударником. Результаты снимались анализатором спектра вибраций 795М с помощью датчика ускорений ДН-3-М1. Численные исследования выполнены в модуле переходного динамического анализа. Для полученных зависимостей построены преобразования Фурье. Отдельным этапом расчётно-экспериментальных исследований было выполнено варьирование массы боевого модуля. Определено, что результаты, полученные экспериментальным методом, хорошо согласуются с аналогичными результатами, которые получены расчётными методами.

Ключевые слова: динамическая система; экспериментальные исследования; численные исследования; метод конечных элементов; бронетранспортер; макет

**A. GRABOVSKIY, M. A. TKACHUK, M. A. BONDARENKO, E. PELESHKO, A. VASILIEV,
A. TANCHENKO, H. TSENDRA, A. SHEVCHENKO**

COMPUTATION AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE ARMOUR HULL MODEL

The paper presents a computational experimental comparison of the dynamic characteristics of a fragment of a model body of an armored personnel carrier. The method of experimental research was to determine the dynamic response from the action of a shock load by a rubberized drummer. The results were recorded with a 795M vibration spectrum analyzer using an acceleration sensor DN-3-M1. Numerical studies are performed in the module of transient dynamic analysis. For the obtained dependencies, the Fourier transform is constructed. A separate stage of computational and experimental studies was performed varying the mass of the combat module. It is determined that the results obtained by the experimental method are in good agreement with the similar results obtained by calculation methods. The comparison was performed for accelerations, velocities and displacements at control points and for Fourier transform also. The influence of tower mass on the natural oscillations spectrum was also analyzed in the work. Studies have shown that increasing of tower mass reduces the system's natural frequency.

Keywords: Dynamic system; experimental studies; numerical studies; finite element method; armored personnel carrier; layout

Вступ. Сучасні дослідження в більшості випадків виконуються за допомогою чисельних методів із застосуванням комп'ютерів [1–5]. Такий підхід дозволяє отримувати велику кількість даних про досліджуваний об'єкт, кількість яких суттєво перевершує одержуваний обсяг при виконанні експерименту. Більш того, такі розрахунки виконуються для «ідеалізованої» конструкції, тобто матеріал, з якого виготовляється об'єкт, буде без дефектів, всі зварні шви «ідеальними», листи однієї товщини тощо. Однак такі методи моделювання можуть привести до помилкових результатів, це може бути пов'язано з постановкою завдання, а саме: неврахування фізичних ефектів, неправильний вибір типу аналізу, застосування лінійних моделей. Для верифікації чисельних моделей застосовуються розрахунково-експериментальні методи [6–8]. Суть цього методу полягає в тому, що окремі розрахункові моделі перевіряються експериментальним шляхом для верифікації та коригування чисельних досліджень. Ці методи на початкових етапах можуть

виконуватися на макетах, а перед етапом запуску виробу у серію – на реальних зразках.

Мета і завдання досліджень. Із урахуванням зазначених обставин актуальною і важливою науково-практичною проблемою є верифікація чисельних моделей, отриманих на попередніх етапах досліджень [9–11], а саме дослідження власних частот і власних форм коливань та спроба їх зміни у необхідний діапазон. Для проведення експерименту розглянуто верхній пояс корпусу бронетранспортера як його найбільш навантажену частину. Верхній пояс корпусу являє собою зварену тонкостінну просторову конструкцію і складається з підбаштового, передніх, бічних і задніх листів, верхньої частини моторно-трансмійного відділення. Макет корпусу виготовлений з листів металу товщиною 1,5 мм методом зварювання і має наступні габаритні розміри: довжина –

© А. В. Грабовський, М. А. Ткачук, М. О. Бондаренко,
Є. В. Пелешко, А. Ю. Васильєв, А. Ю. Танченко,
Г. В. Цендра, А. В. Шевченко, 2019

810 мм, ширина – 310 мм, висота – 33 мм, вага отриманої конструкції дорівнює 3,3 кг. Зовнішній вигляд макета фрагмента корпусу БТР-80 представлений на рис. 1.

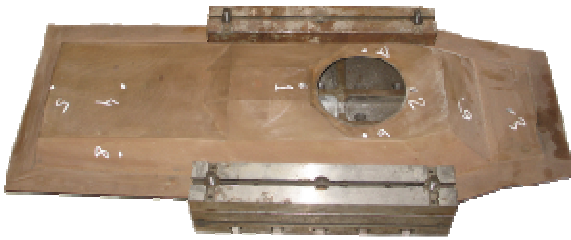


Рисунок 1 – Макет фрагменту корпусу БТР-80 з місцями кріплення датчику

Чисельні дослідження фрагменту макету. Чисельні дослідження фрагмента макету корпусу БТР-80 були виконані в модулі для дослідження перехідних динамічних процесів. Геометрична та скінченно-елементна моделі з умовами закріплення представлена на рис. 2. На рис. 3. наведена функція силового імпульсного навантаження, яке прикладалася по черзі до вказаних на рис. 1 точках.

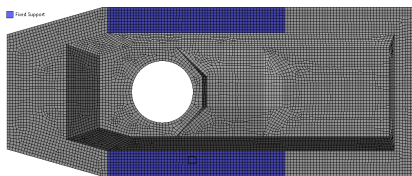


Рисунок 2 – Геометрична та скінченно-елементна моделі з умовами закріплення

На рис. 4–15 наведені чисельні розрахунки для прискорень, швидкостей, та переміщень від імпульсного навантаження в заданих точках. Інтегрування виконувалося 0.1с, з 1000 шагами інтегрування.

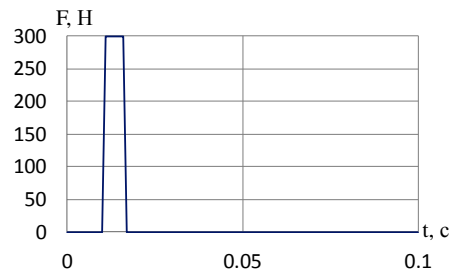


Рисунок 3 – Силowe імпульсне навантаження при чисельному розрахунку

Експериментальні дослідження. Експериментальні дослідження макету (рис. 1) виконані шляхом силового впливу в області зазначених точок гумовим ударником. В якості досліджуваних характеристик виступали затухаючі вільні коливання, а саме прискорення, швидкості та переміщення. Характерні точки конструкції вибиралися виходячи з результатів попереднього розрахунку її власних частот і форм коливань, і є місцями виникнення найбільших переміщень, або найбільш чутливими з точки зору працездатності досліджуваного корпусу (коливання навколо погону башти). Частотні характеристики визначалися за допомогою аналізатора спектра вібрацій 795M та вібропелетворювача ДН-3-М1, рис. 16.

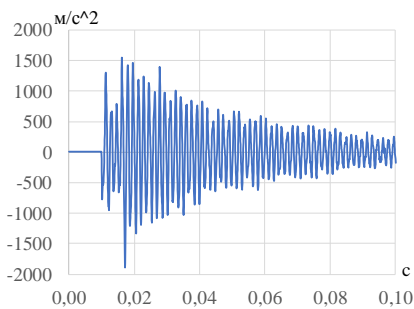


Рисунок 4 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 1 з відкритим верхом

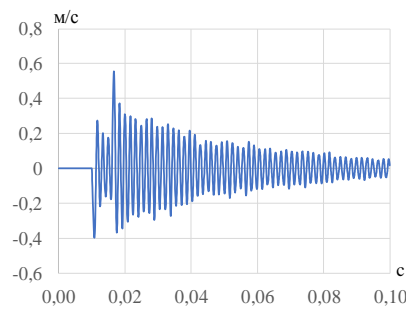


Рисунок 5 – Графік розподілу швидкостей в часі в точці 1 з відкритим верхом

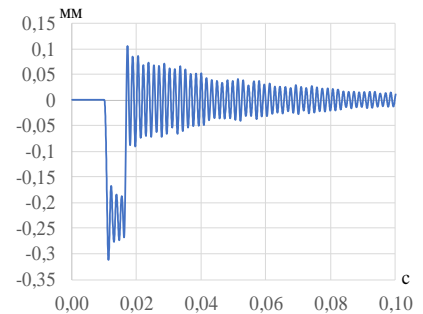


Рисунок 6 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 1 з відкритим верхом

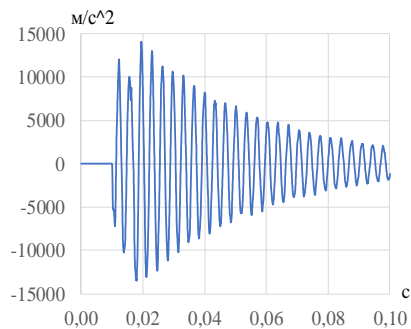


Рисунок 7 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 2 з відкритим верхом

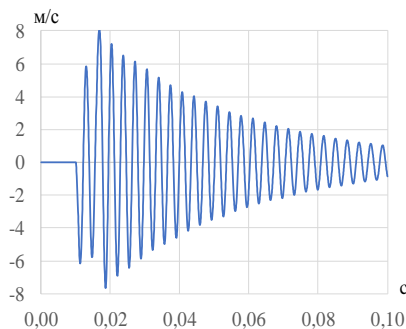


Рисунок 8 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з відкритим верхом

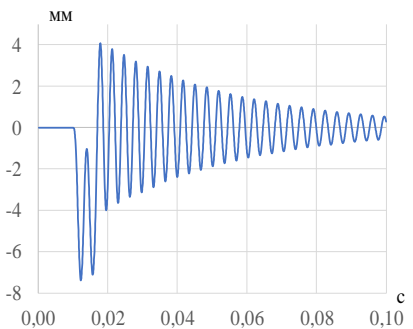


Рисунок 9 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з відкритим верхом

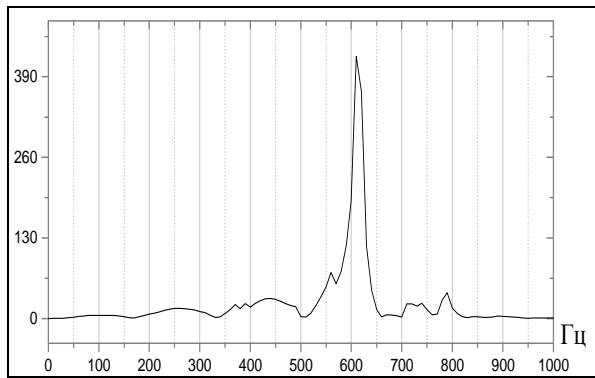


Рисунок 10 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 4

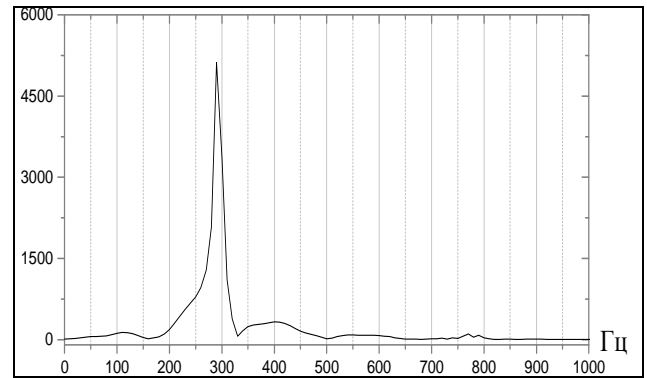


Рисунок 11 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 8

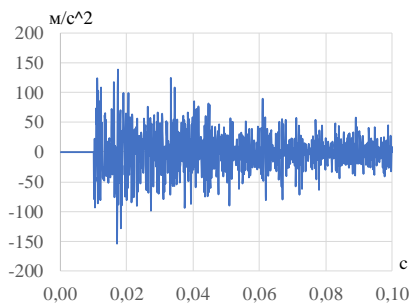


Рисунок 12 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 6 з відкритим верхом

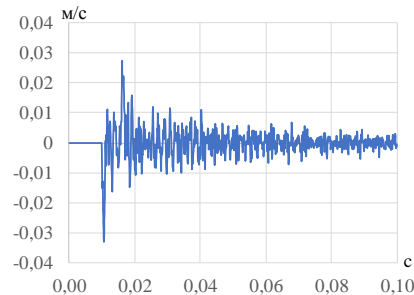


Рисунок 13 – Графік розподілу швидкостей в часі в точці 6 з відкритим верхом

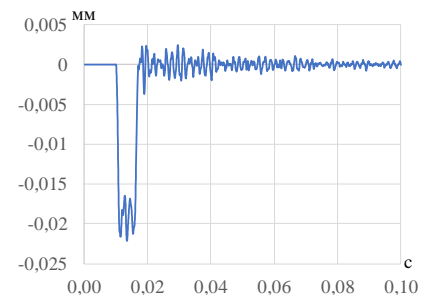


Рисунок 14 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 6 з відкритим верхом

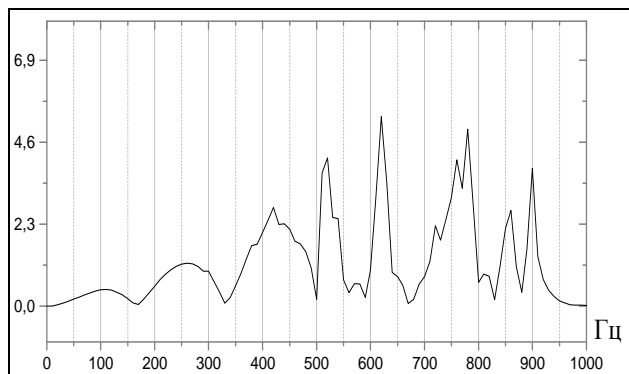


Рисунок 15 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 12



Рисунок 16 – Аналізатор спектра вібрацій та датчик ДН-3-М1

На рис. 17–28 в графічній формі представлені отримані в ході експериментальних досліджень розподіли прискорень в часі макету бронетранспортеру з відкритим верхом в точках 1, 2, 6, що описують його відгук на ударну дію.

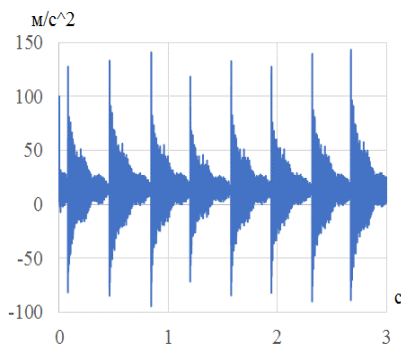


Рисунок 17 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 1 з відкритим верхом на інтервалі 3 с

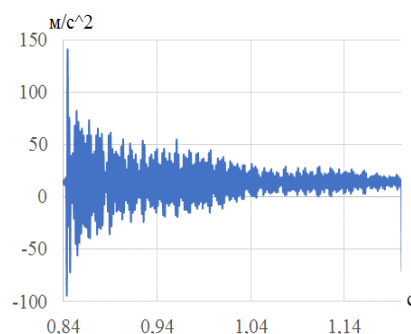


Рисунок 18 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 1 з відкритим верхом на інтервалі від 0,84 до 1,15 с

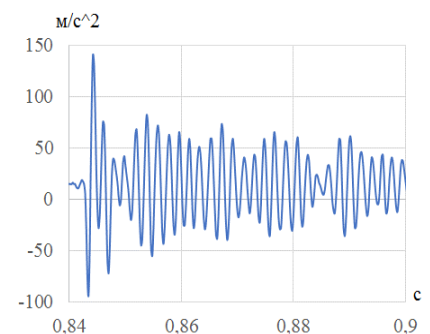


Рисунок 19 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 1 з відкритим верхом на інтервалі від 0,84 до 0,9 с

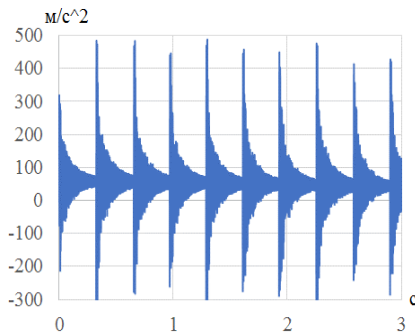


Рисунок 20 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 2 з відкритим верхом на інтервалі 3 с

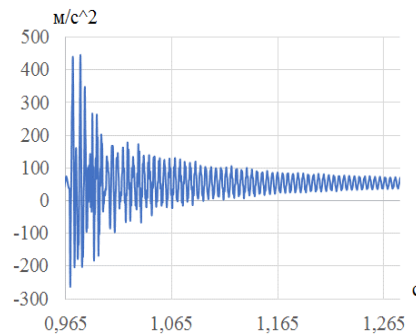


Рисунок 21 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 2 з відкритим верхом на інтервалі від 0,965 до 1,27 с

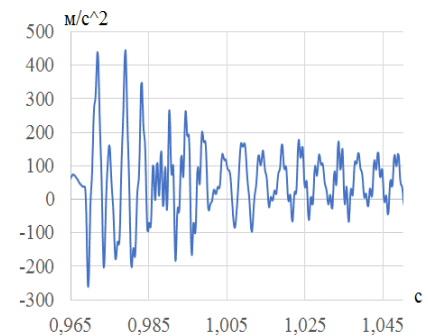


Рисунок 22 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 2 з відкритим верхом на інтервалі від 0,965 до 1,05 с

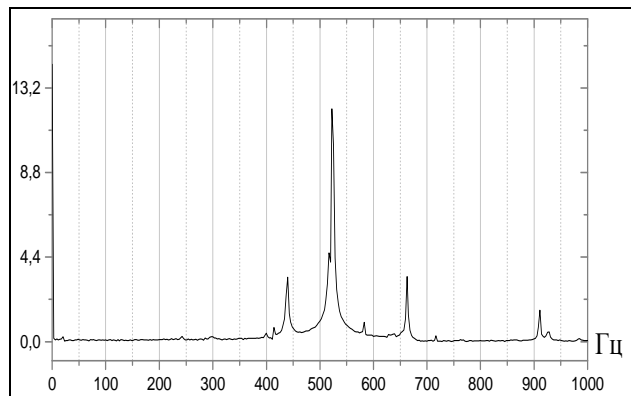


Рисунок 23 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 18

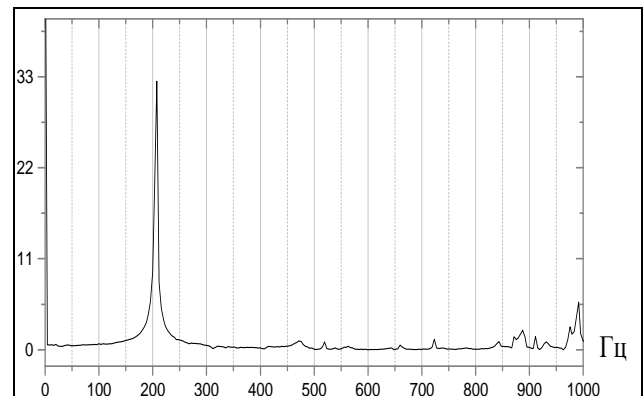


Рисунок 24 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 22

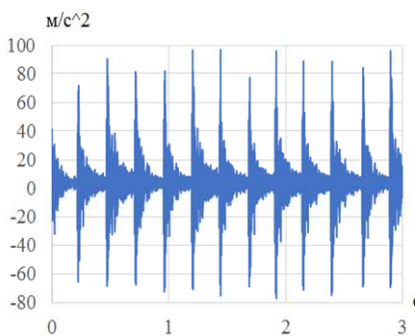


Рисунок 25 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 6 з відкритим верхом на інтервалі 3 с

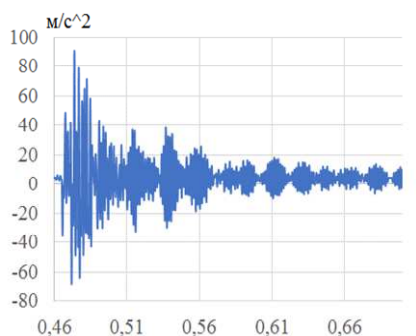


Рисунок 26 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 6 з відкритим верхом на інтервалі від 0,46 до 0,7 с

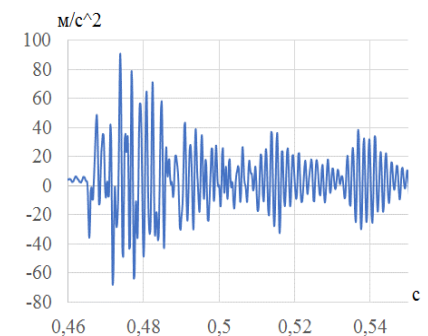


Рисунок 27 – Графік розподілу прискорень в часі в точці 6 з відкритим верхом на інтервалі від 0,46 до 0,55 с

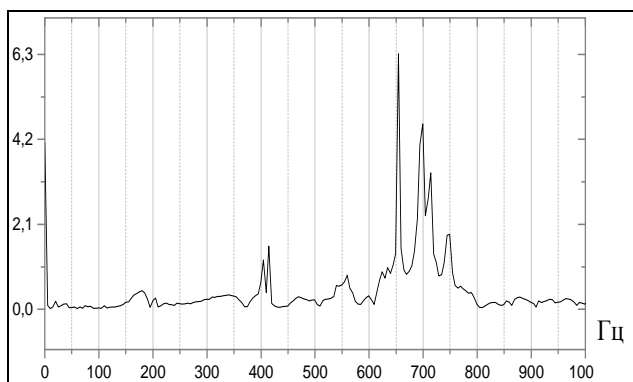


Рисунок 28 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 26

Аналогічні графіки були отримані і для інших

точок, в тому числі графіки швидкостей і переміщень.

Чисельні дослідження фрагменту макету з варійованою масою башти. На другому етапі досліджень фрагменту макету корпусу були виконані розрахунки з варійованою масою башти. В розрахунках башта була замінена плоским листом з подвійною товщиною. Лист з'єднано з корпусом макету сумісною скінченно-елементною сіткою, до якого приєднувалася точкова маса (рис. 29). Всі інші параметри розрахунку залишилися незмінними відносно попередніх розрахунків.

На рис. 30–37 наведені переміщення та частотний спектр для точки 2, зазначеній на рис. 1 з різними варіантами моделювання башти, а саме: башта відсутня; місце під башту «зашиито» листом; додаткова маса 1 кг; та додаткова маса 2,5 кг.

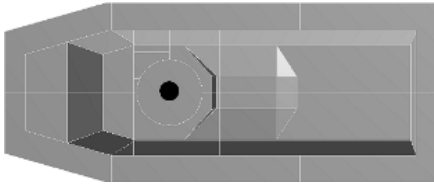


Рисунок 29 – Зображення моделювання башти

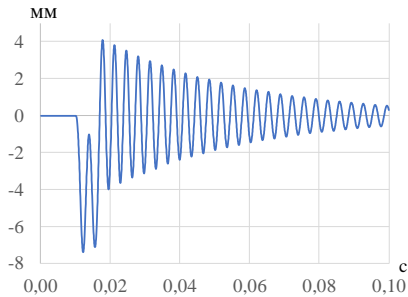


Рисунок 30 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з відсутньою баштою

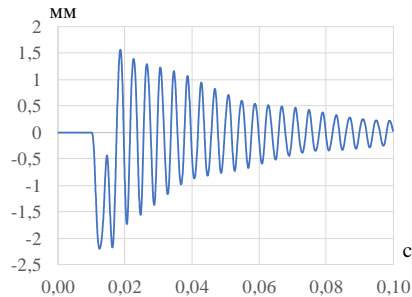


Рисунок 32 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з моделюванням підбаштового листа

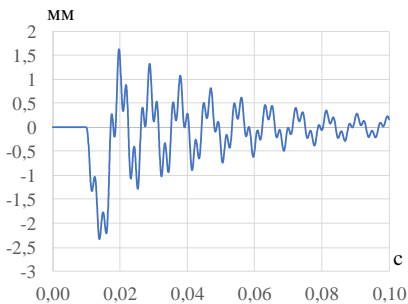


Рисунок 34 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з моделюванням башти масою 1 кг

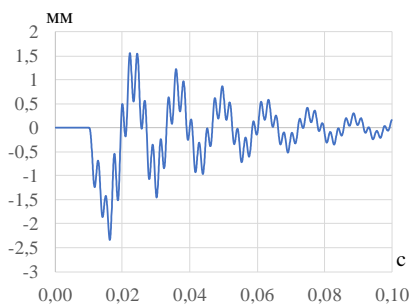


Рисунок 36 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з моделюванням башти масою 2,5 кг

Експериментальні дослідження з варійованою масою башти. Варто зазначити, що експеримент був виконаний з різною вагою башти, умовно заміненої залізними пластинами вагою 0.5 кг кожна (рис. 38). Тобто були виконані експерименти з відкритим верхом, закритим верхом, масою башти 1 кг і масою башти 2,5 кг.

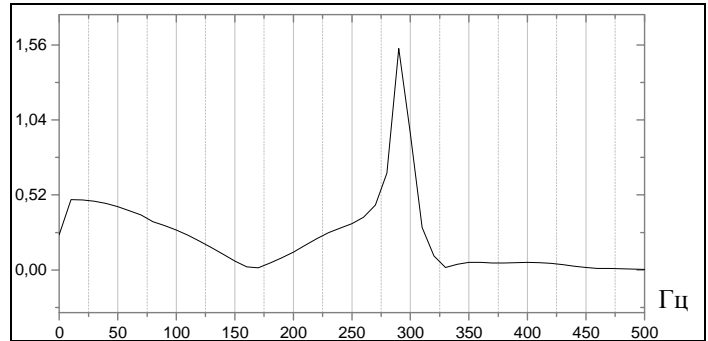


Рисунок 31 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 30

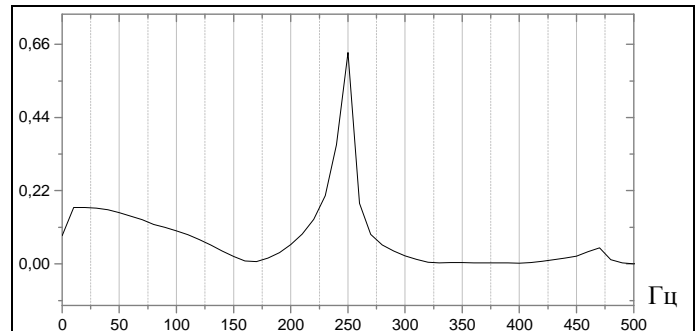


Рисунок 33 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 32

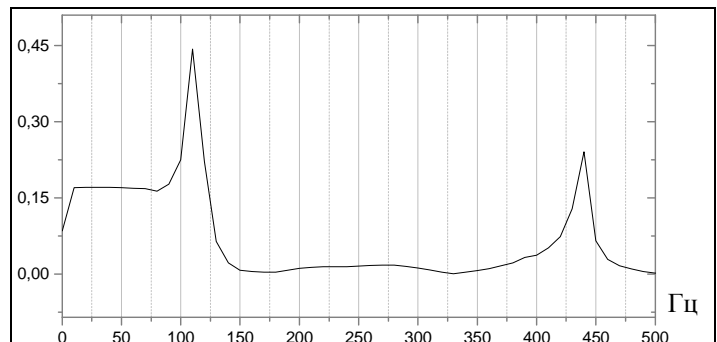


Рисунок 35 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 34

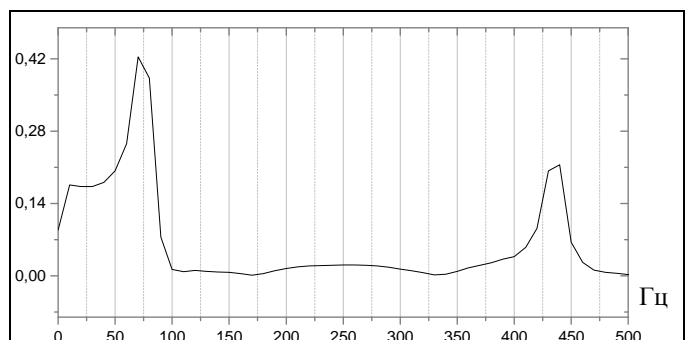


Рисунок 37 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 36

На рис. 39–50 наведені переміщення та спектральний відгук для точки 2, аналогічно чисельному розраху-

нку. Всі характеристики були отримані і для інших точок, які в наведеній статті не показані.



Рисунок 38 – Приклад моделювання башти (на наведеному рисунку 1 кг)

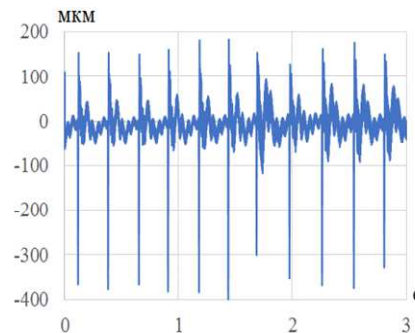


Рисунок 39 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з відсутньою баштою

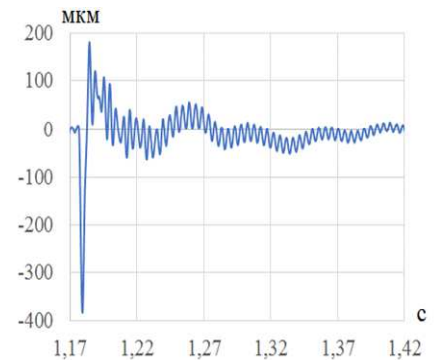


Рисунок 40 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з відсутньою баштою (1 імпульс)

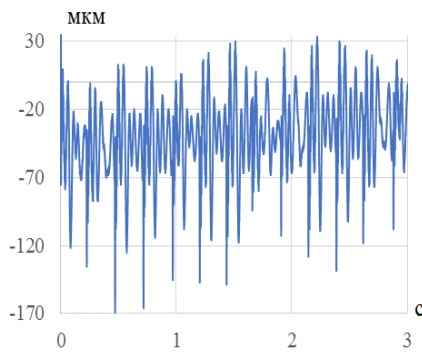


Рисунок 41 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з моделюванням підбаштового листа

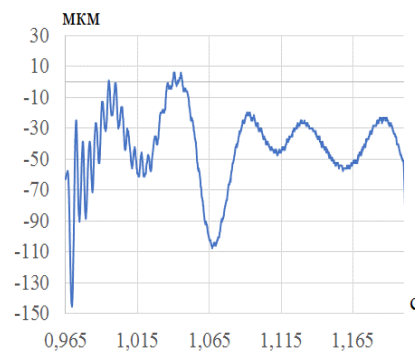


Рисунок 42 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з моделюванням підбаштового листа (1 імпульс)

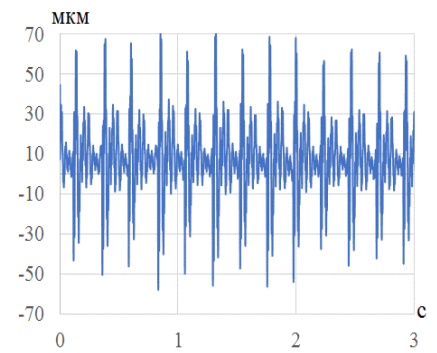


Рисунок 43 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з моделюванням башти масою 1 кг

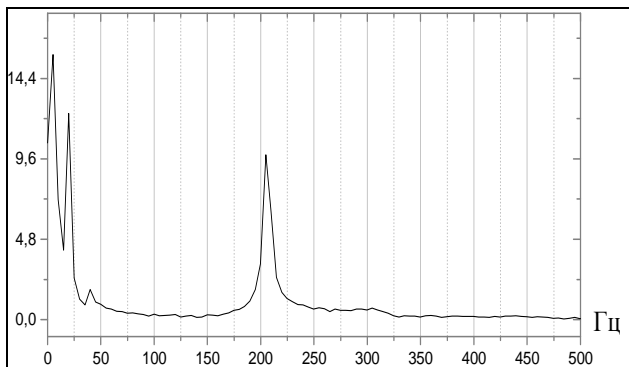


Рисунок 44 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 40

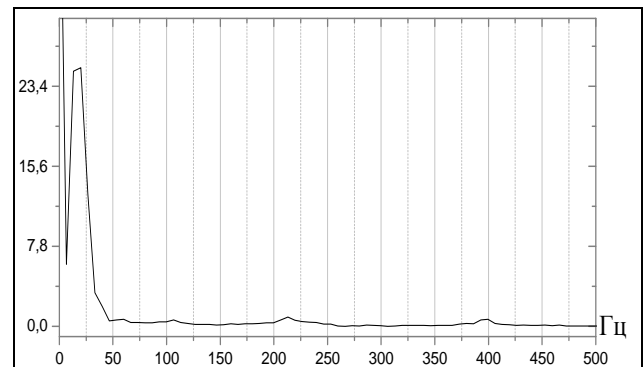


Рисунок 45 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 43



Рисунок 46 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з моделюванням башти масою 1 кг (1 імпульс)

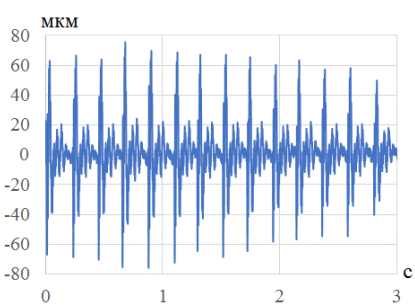


Рисунок 47 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з моделюванням башти масою 2,5 кг

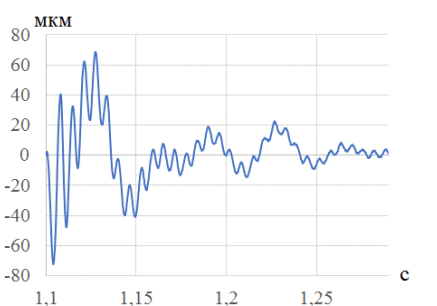


Рисунок 48 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 з моделюванням башти масою 2,5 кг (1 імпульс)

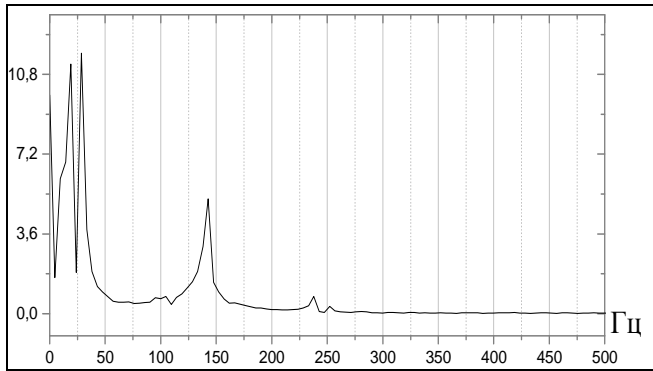


Рисунок 49 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 46

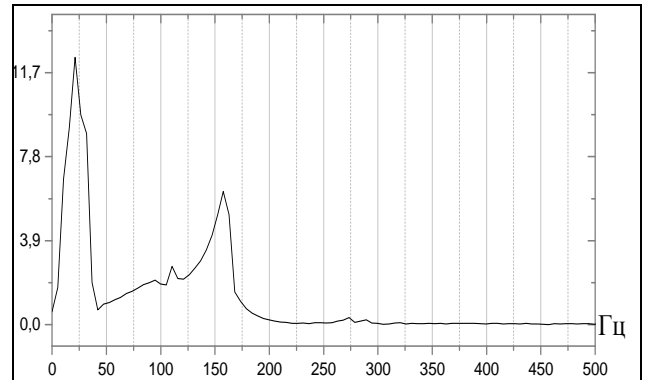


Рисунок 50 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 49

Висновки. У роботі наведено порівняння розрахункових та експериментальних результатів. Ці дослідження показали задовільну відповідність результатів. Порівняння виконувалося за прискореннями, швидкостями та переміщеннями в контрольних точках, а також за перетвореннями Фур'є. В роботі також було проаналізовано вплив маси башти на спектр власних коливань. Дослідження показали, що збільшення маси башти зменшує власну частоту системи.

Список літератури

1. Qiong, Z., L. Zhengnong, W. Honghua Modal analysis of trough solar collector. *Solar Energy*. 2017. Vol. 141. P. 81–90.
2. Yu, H., C. Wujun, C. Yufeng, Z. Daxu, Q. Zhenyu Modal behaviors and influencing factors analysis of inflated membrane structures. *Engineering Structures*. – 2017. Vol. 132. P. 413–427..
3. Apedo K. L., S.Ronel, E.Jacquelin, S.Tiem Free vibration analysis of inflatable beam made of orthotropic woven fabric. *Thin-Walled Structures*. 2014. Vol. 78. P. 1–15.
4. Wei, S., Z. Mingwei, W. Zhuo Free vibration analysis of a hard-coating cantilever cylindrical shell with elastic constraints. *Aero-space Science and Technology*. 2017. Vol. 63. P. 232–244.
5. Tkachuk M., M. Bondarenko, A. Grabovskiy [и др.] Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1/7 (91). – P. 18–29.
6. Peter S., F. Schreyer, R. I. Leine A method for numerical and experimental nonlinear modal analysis of nonsmooth systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol 120. P. 793–807.
7. Honarpardaz M., M. Tarkian, J. Ölvander, X. Feng Experimental verification of design automation methods for robotic finger. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017. Vol. 94. P. 89–101..
8. Zieliński T. G., F. Chevillotte, E. Deckers Sound absorption of plates with micro-slits backed with air cavities: Analytical estimations, numerical calculations and experimental validations. *Applied Acoustics*. 2019. Vol. 146. P. 261–279.
9. Грабовський А. В., Н. А. Ткачук, Н. Н. Ткачук, А. Ю. Танченко, И. В. Мазур Чувствительность собственных форм колебаний систем с несколькими степенями свободы к варьированию параметров динамической системы. *Вестник НТУ «ХПИ»*. Серия: Транспортное машиностроение. Х.: НТУ «ХПИ». 2015. № 43. С. 25–29.
10. Грабовський А. В. Влияние варьируемых инерционно-жесткостных параметров на характеристики динамических многомассовых систем. *Вестник НТУ «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. Х.: НТУ «ХПИ». 2016. № 12 (1184). С. 17–22.

11. Грабовський А. В., М. А. Ткачук, К. О. Мерецька, М. М. Ткачук, А. Ю. Васильєв, М. О. Бондаренко, Н. Б. Скрипченко Вплив варійованих параметрів на власні коливання бронекопусів легкоброньованих машин. *Механіка та машинобудування*. – 2018. № 1. С. 65–74.

References (transliterated)

1. Qiong, Z., L. Zhengnong, W. Honghua Modal analysis of trough solar collector. *Solar Energy*. 2017, vol. 141, pp. 81–90.
2. Yu, H., C. Wujun, C. Yufeng, Z. Daxu, Q. Zhenyu Modal behaviors and influencing factors analysis of inflated membrane structures. *Engineering Structures*. 2017, vol. 132, pp. 413–427..
3. Apedo K. L., S.Ronel, E.Jacquelin, S.Tiem Free vibration analysis of inflatable beam made of orthotropic woven fabric. *Thin-Walled Structures*. 2014, vol. 78, pp. 1–15.
4. Wei, S., Z. Mingwei, W. Zhuo Free vibration analysis of a hard-coating cantilever cylindrical shell with elastic constraints. *Aero-space Science and Technology*. 2017, vol. 63, pp. 232–244.
5. Tkachuk M., M. Bondarenko, A. Grabovskiy [и др.] Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, no 1/7 (91), pp. 18–29.
6. Peter S., F. Schreyer, R. I. Leine A method for numerical and experimental nonlinear modal analysis of nonsmooth systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, no 120, pp.793–807.
7. Honarpardaz M., M. Tarkian, J. Ölvander, X. Feng Experimental verification of design automation methods for robotic finger. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017, vol. 94, pp. 89–101..
8. Zieliński T. G., F. Chevillotte, E. Deckers Sound absorption of plates with micro-slits backed with air cavities: Analytical estimations, numerical calculations and experimental validations. *Applied Acoustics*. 2019, vol. 146, pp. 261–279.
9. Grabovskiy A. V., N. A. Tkachuk, N. N. Tkachuk, A. Yu. Tanchenko, I. V. Mazur Chuvstvitel'nost' sobstvennykh form kolebaniy sistem s neskol'kimi stepenyami svobody k var'irovaniyu parametrov dinamicheskoy sistemy. *Vestnik NTU «KhPI»*. Seriya: Transportnoe mashinostroenie. – Kh.: NTU «KhPI». 2015, no 43, pp. 25 – 29.
10. Grabovskiy A. V. Vliyanie var'iruemykh inertsionno-zhestkostnykh parametrov na kharakteristiki dinamicheskikh mnogomassovykh sistem. *Vestnik NTU «KhPI»*. Seriya: Novey resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh. Kh.: NTU «KhPI». 2016, no 12(1184), pp. 17–22.
11. Grabovskiy A. V., M. A. Tkachuk, K. O. Meretska, M. M. Tkachuk, A. Yu. VasilEv, M. O. Bondarenko, N. B. Skripchenko Vpliv var'lyovanih parametrv na vlasni kolivannya bronekorpustv legkobronovanih mashin. *Mehanika ta mashinobuduvannya*. 2018, no 1, pp. С. 65–74.

Надійшла (received).12.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Andrey Grabovskiy) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Бондаренко Марина Олександрівна (Бондаренко Марина Александровна, Bondarenko Maryna) – кандидат технічних наук (PhD.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1856-3648>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: marina.bondarenko@tmm-sapr.org.

Пелешко Євген Віталійович (Пелешко Евгений Витальевич, Peleshko Ievgen) – кандидат технічних наук, інженер-конструктор ТОВ «БІП Україна», м. Одеса, Україна.

Васильєв Антон Юрійович (Васильев Антон Юрьевич, Anton Vasiliev) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

Танченко Андрій Юрійович (Танченко Андрей Юрьевич, Tanchenko Andriy) – кандидат технічних наук (PhD.), старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0388-0192>; тел.: (057) 707-61-66; e-mail: ATanchenko@tmm-sapr.org.

Цendra Георгій Вікторович (Цendra Георгий Викторович, Tsendra Heorgii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ст. гр. МІТ-836МП(ТМ); м. Харків, Україна

Шевченко Андрій Валерійович (Шевченко Андрей Валерьевич, Shevchenko Andriy) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ст. гр. МІТ-836МП(ТМ); м. Харків, Україна